Optische Filter für Raman-Mikroskopie

Für ein dispersives Raman-Mikroskop ist die technisch sauberste Standardlösung in den meisten Fällen kein einzelner Filter, sondern ein Filtersatz mit klar getrennten Aufgaben: ein schmaler Laser-Line-/Bandpass-Clean-up-Filter im Anregungsweg, ein ultrasteiler Kantenfilter im Detektionsweg und — bei Backscattering/Epi-Geometrie mit gemeinsamem Anregungs- und Sammelstrahlengang — ein 45° dichroitischer Beamsplitter. Semrock und Chroma beschreiben genau diese Architektur als Standard für leistungsfähige Raman-Systeme; Semrock weist zudem explizit darauf hin, dass in Common-Path-Systemen trotz 45°-Dichroik vor dem Spektrometer zusätzlich ein normal einfallender Laser-Blocking-Filter stehen sollte.

Die klare Empfehlung nach Filtertyp lautet deshalb: Longpass-Edge-Filter sind die beste Default-Wahl für Stokes-Raman, wenn kleine Raman-Verschiebungen möglichst nahe an der Laserlinie sichtbar werden sollen; Shortpass-Edge-Filter sind das Anti-Stokes-Pendant; Notch-Filter sind vorzuziehen, wenn Stokes und Anti-Stokes gleichzeitig gemessen werden sollen oder wenn mehr Winkeltuning/Toleranz gegenüber variablen Laserlinien gebraucht wird; Bandpass-/Laser-Line-Filter gehören primär in den Anregungsweg als Clean-up, nicht als alleiniger Rayleigh-Blocker; dichroitische Filter sind vor allem Strahlteiler, nicht der finale Laser-Stopper; Razor-Edge ist praktisch die Raman-optimierte, ultrasteile Hochleistungsform des Kantenfilters.

Die wichtigste realistische Erwartung ist: Filter lösen Rayleigh-/Streulichtprobleme sehr gut, aber Probenfluoreszenz nur begrenzt. Sichtbare Anregung kann starke Fluoreszenz verursachen; Renishaw empfiehlt in solchen Fällen den Wechsel auf NIR oder UV, und Edinburgh Instruments weist darauf hin, dass 1064 nm vor allem für extrem fluoreszierende Proben sinnvoll ist — dann aber mit InGaAs-Detektor, weil die Quanteneffizienz von Siliziumdetektoren um 1000 nm stark abfällt. Gleichzeitig sinkt die spontane Raman-Effizienz mit etwa λ^{-4}; HORIBA nennt für IR gegenüber blau/grün eine Abnahme um 15× oder mehr, und für 785 nm gegenüber 532 nm ungefähr 5×.

Für niedrige Raman-Verschiebungen ist der Filter oft die eigentliche Grenze des Systems. Standard-Edge-Filter in kommerziellen Raman-Mikroskopen liegen häufig im Bereich ca. 50–100 cm^{-1}, hochwertige ultrasteile Kantenfilter erreichen bei 785 nm je nach Güteklasse etwa 63 cm^{-1} oder 126 cm^{-1} als 50%-Übergang, und spezialisierte Low-Frequency-Lösungen auf Basis von VBG/PTR-Glas oder Triple-Spektrometern gehen bis ~10 cm^{-1}, teils 4–5 cm^{-1}. Wer unterhalb von ~20 cm^{-1} arbeiten will, sollte deshalb nicht “nur bessere Edge-Filter” erwarten, sondern gezielt nach Low-Frequency-Modulen, VBG-Notch/Bandpass-Kombinationen oder triple-subtractive Optiken suchen.

Empfehlung und Einordnung

Für nicht oder nur schwach fluoreszierende Proben ist ein Stokes-orientierter Aufbau mit Longpass-Edge-Filter fast immer die beste Wahl, insbesondere bei 532 nm oder 633 nm, weil diese Wellenlängen eine hohe Raman-Streueffizienz liefern und ultrasteile Edge-Filter

sehr nahe an die Laserlinie herankommen. Ist das Ziel nicht symmetrische Stokes/Anti-Stokes-Spektroskopie, sondern maximale Empfindlichkeit nahe kleiner Stokes-Verschiebungen, dann ist ein ultrasteiler Raman-Edge-Filter dem Notch-Filter klar überlegen.

Für organische, polymerbasierte, biologische oder allgemein fluoreszenzanfällige Proben ist 785 nm meist die robusteste Standardwahl, weil man Fluoreszenz oft deutlich reduziert, ohne sofort in die 1064-nm-Detektorproblematik hineinzugeraten. Wenn selbst 785 oder 830 nm noch keine brauchbaren Spektren liefern, ist 1064 nm sinnvoll, aber nur mit der realistischen Erwartung: weniger Fluoreszenz, dafür deutlich schwächeres Raman-Signal, andere Detektortechnik und meist gröbere spektrale Auflösung bzw. höhere Anforderungen an das Gesamtsystem. Filterseitig bleibt das Grundprinzip gleich: sauberer Laser-Line-Clean-up + scharfer Rayleigh-Blocker + ggf. Dichroik.

Für Resonance Raman oder UV-Raman ist die Filterwahl stärker wellenlängen- und materialspezifisch. Renishaw weist darauf hin, dass UV-Anregung Resonanzeffekte gezielt nutzen kann, um Raman-Signale stark zu verstärken; Semrock bietet Raman-spezifische Edge- und Dichroik-Lösungen weit in den UV-Bereich hinein an. In diesem Bereich wird ein sauber definierter Laser-Line-Clean-up-Filter besonders wichtig, weil spektrale Verunreinigungen, Beschichtungsfluoreszenz und Materialalterung stärker ins Gewicht fallen können.

Für Backscattering-/Epi-Mikroskopie mit gemeinsamem Strahlengang ist ein 45°-Dichroic in der Praxis fast zwingend. Für Transmission-Raman oder Geometrien mit getrenntem Anregungs- und Sammelweg ist ein Dichroic dagegen oft optional, solange die Strahlwege getrennt bleiben; dann reichen Clean-up plus Laser-Blocking-Filter im Prinzip aus. Entscheidend ist also weniger “Mikroskopie vs. keine Mikroskopie” als die Frage, ob Anregung und Emission denselben optischen Pfad benutzen.

Wenn das Budget nicht spezifiziert ist, ist die sinnvollste Priorisierung — als begründete System-Inferenz —: zuerst den eigentlichen Rayleigh-/Laser-Blocking-Filter optimieren, danach den Laser-Clean-up-Filter, danach den Dichroic. Der Grund ist, dass Rayleigh-Streuung typischerweise etwa 10^7-mal stärker ist als das Raman-Signal und der finale Blocking-Filter maßgeblich bestimmt, wie nah man an die Laserlinie herankommt; der Clean-up-Filter wird dann zum zweiten wichtigen Baustein, wenn Laser-ASE, Nebenmoden, Plasma-Linien oder Faserhintergrund das Spektrum verschmutzen.

Filtertypen im Detail

Bandpass- und Laser-Line-Clean-up-Filter. Ihr Funktionsprinzip ist ein schmaler Durchlass um die Laserwellenlänge bei gleichzeitiger Sperrung der spektralen Nachbarschaft. In Raman-Systemen sitzen sie idealerweise vor der Probe und sorgen dafür, dass nur die gewünschte Laserlinie die Probe erreicht. Semrock nennt dafür ausdrücklich die Unterdrückung von broadband spontaneous emission und Plasma-Linien; in Faser-Mikrosonden helfen solche Filter zusätzlich, Raman- oder Fluoreszenzbeiträge zu unterdrücken, die bereits zwischen Laser und Probe entstehen. Typische Spezifikationen hochwertiger Raman-Clean-up-Filter

sind >90 % Transmission am Design-Laser und sehr schmale nominale FWHM, z. B. bei Semrock 1.4–2.0 nm bei 532 nm, 1.7–2.5 nm bei 633 nm und 2.3–3.5 nm bei 785 nm; Thorlabs gibt für harte NIR-Bandpassfilter allgemein 3–70 nm FWHM, meist OD > 5 außerhalb des Passbands, Betrieb bei 0° AOI und als typische Einsatztemperatur −40 bis 90 °C an. Der große Vorteil ist die saubere Laserlinie und damit deutlich weniger künstlicher Untergrund; der Nachteil ist, dass ein Bandpassfilter kein vollständiger Ersatz für den eigentlichen Rayleigh-Blocker ist. Die SNR-Verbesserung ist hoch, wenn der Laser "schmutzig" ist, aber oft nur moderat, wenn der Laser bereits spektral sehr rein ist.

Longpass-Edge-Filter. Diese Kantenfilter blockieren die Laserlinie und kürzere Wellenlängen und lassen längere Wellenlängen durch; im Raman-Kontext sind sie deshalb das Standardwerkzeug für Stokes-Messungen. HORIBA beschreibt den klassischen Fall so, dass ein 532-nm-Edge-Filter Licht bis etwa 533.5 nm sperrt und damit ein Messfenster ab etwa 50 cm^{-1} öffnet. Thorlabs nennt für generische harte Edgepass-Filter typische Werte von OD > 5 im Sperrband, >85–90 % Transmission im Durchlassband, Cut-on/Cut-off-Toleranzen von ±0.75 % und Auslegung für 0° AOI; Omega beschreibt Raman-Longpass-Edge-Filter als Laser-Rejection-Lösung im kollimierten Detektionsstrahl mit steiler Flanke, OD > 5 und ca. 85–95 % Signaltransmission. Der große Vorteil ist die beste Zugänglichkeit kleiner Stokes-Verschiebungen; die Nachteile sind die blinde Zone nahe 0 cm^{-1}, die fehlende Anti-Stokes-Erfassung und die deutliche Empfindlichkeit gegenüber Einfallswinkel, Strahlkegel und Polarisation. In realistischen Raman-Mikroskopen ist dies dennoch die Default-Wahl für Stokes-Raman.

Shortpass-Edge-Filter. Das Funktionsprinzip ist das spiegelbildliche Gegenstück: kürzere Wellenlängen werden durchgelassen, längere gesperrt. Für Raman heißt das: ein Shortpass-Filter passt für Anti-Stokes-only-Messungen, weil Anti-Stokes-Photonen kürzerwellig als der Laser sind. Semrock und Thorlabs behandeln Shortpass-Filter als reguläre Edge-Filterklasse mit denselben Grundproblemen wie Longpass: exakte AOI-Auslegung, spektrische Verschiebung bei Tilt, Verbreiterung in unkollimierten oder konvergenten Strahlen und klare Wellenlängenspezifikation. Praktisch sind sie in Standard-Raman-Mikroskopen seltener, weil spontane Anti-Stokes-Signale meist schwächer als Stokes-Signale sind; wo Anti-Stokes jedoch bewusst gemessen wird — etwa für Temperatur- oder Populationsinformationen — ist der Shortpass der richtige Kantenfilter.

Razor-Edge und andere ultrasteile Raman-Edge-Filter. "RazorEdge" ist eine Semrock-Produktfamilie, steht praktisch aber für die Raman-optimierte Unterklasse besonders steiler Kantenfilter. Hier liegt der technische Kern in der minimalen Transition Width, also dem kleinsten Spektralabstand zwischen tiefer Blocking-Zone und 50%-Transmission. Semrock nennt für seine Klassen ungefähr <0.5 % der Laserwellenlänge für RazorEdge E-grade, <1.0 % für U-grade, <2.5 % für EdgeBasic und <0.2 % für Verona. Für 785 nm bedeutet das nach Herstellerangabe ungefähr 63 cm^{-1} bei E-grade und 126 cm^{-1} bei U-grade; bei 532 nm nennt Semrock für Verona <39 cm^{-1}. Genau diese enge Flanke ist der Hauptgrund, warum ultrasteile Raman-Edges in der Praxis die beste Wahl für kleinste Stokes-Verschiebungen sind. Nachteile sind der höhere Preis, die stärkere Empfindlichkeit auf

AOI/Polarisationsfehler und die Tatsache, dass auch der Laser-Clean-up-Filter hinreichend steil sein muss; Semrock zeigt im Katalog explizit, dass ein älterer, weniger steiler Laser-Line-Filter mit einem sehr steilen Edge-Filter nicht immer sauber genug zusammenarbeitet.

Notch-Filter. Sie sperren nur ein relativ schmales Band um die Laserwellenlänge und lassen sowohl kürzere als auch längere Wellenlängen durch. Genau deshalb sind sie der natürliche Kandidat, wenn Stokes und Anti-Stokes gleichzeitig gemessen werden sollen. Hier muss man jedoch zwischen Technologien unterscheiden: HORIBA beschreibt holographische Notch-Filter als klassische Raman-Komponente mit schmaler Absorption im Bereich weniger Nanometer und dem Vorteil symmetrischer Messung, weist aber auch auf endliche Lebensdauer/Alterung hin; Semrock hebt für harte StopLine-Notchfilter dagegen >90 % Transmission, OD > 6, ~3 % Notch-Bandbreite bezogen auf die Laserwellenlänge und gute Umweltstabilität hervor. In den Semrock-Katalogdaten liegen typische 50%-Notchbreiten bei etwa 17 nm für 532 nm, 25 nm für 633 nm und 39 nm für 785 nm. Der Hauptvorteil des Notch-Filters ist also die zweiseitige Spektraldurchlässigkeit; der Hauptnachteil ist die im Vergleich zum ultrasteilen Edge deutlich größere blinde Zone um die Laserlinie. Für sehr kleine Stokes-Shifts ist Notch daher meist nicht die erste Wahl, für symmetrische Spektren dagegen sehr wohl.

Dichroitische Filter und Beamsplitter. Ein Raman-Dichroic ist im Kern ein bei meist 45° AOI betriebenes Edge-Element, das den Laser reflektiert und das Raman-Signal transmittiert — oder umgekehrt, je nach Layout. Semrock und Thorlabs definieren solche Dichroics explizit als 45°-Komponenten. Typische Spezifikationen liegen bei >90 % Transmission im Durchlassband und >90 % bzw. >94 % Reflexion an der Laserlinie; ein Semrock-355-nm-Raman-Dichroic ist z. B. mit Rabs >94 % am Laser und Tavg >90 % im Passband spezifiziert. Der Vorteil ist die unverzichtbare Strahlführung in Epi-/Backscatter-Mikroskopen. Der Nachteil ist, dass ein Dichroic kein Ersatz für den finalen Blocking-Filter ist und zusätzlich stärker von Flatness, Wellenfrontfehlern, Polarisation und AOI abhängt als ein normal einfallender Edge-Filter. Für polarisationsabhängige Raman-Messungen ist das besonders wichtig: Eine NIST-Studie von 2026 zeigte, dass häufig verwendete dichroitische Edge-Filter die gemessene Polarisationsantwort anisotroper Raman-Signale signifikant verzerren können. Für quantitative Polarisations-Raman-Messungen ist das kein Randdetail, sondern ein echter Auswahlfaktor.

Generische Longpass/Shortpass-Filter und Speziallösungen für Ultra-Low-Frequency. Ein wichtiger praktischer Unterschied ist nicht nur “Edge vs. Notch”, sondern auch “Raman-optimiert vs. generisch”. Generische harte Longpass-/Shortpass-Filter können für viele Stokes-/Anti-Stokes-Anwendungen völlig genügen, vor allem wenn der interessierende Bereich erst bei >100–300 cm^{-1} beginnt. Für <20 cm^{-1} reichen sie in der Regel nicht. Hier kommen VBG-/PTR-basierte Speziallösungen oder triple-subtractive Instrumente ins Spiel: HORIBA beschreibt für solche ULF-Module VBG-Notch- und Bandpassfilter mit 5–10 cm^{-1} Bandbreite und 50 % Transmission bei <3.5 cm^{-1} Abstand zur Filtermitte; Renishaw nennt für spezielle Eclipse-Filter Routinemessungen bis etwa 10 cm^{-1}. Solche Lösungen sind hervorragend, aber deutlich spezieller, teurer und systemkritischer als normale Raman-

Edge-/Notch-Sets.

Auswahlkriterien und Entscheidungsbaum

Die Auswahl sollte nicht mit der Frage “Edge oder Notch?” beginnen, sondern mit fünf Systemfragen. Erstens: Welche Laserwellenlänge wird tatsächlich verwendet? Raman-Filter sind immer wellenlängenspezifisch; je nach Wellenlänge ändern sich nicht nur Cut-on/Cut-off, sondern auch Detektorwahl, Fluoreszenzrisiko und Raman-Effizienz. Zweitens: Wie nah an die Laserlinie muss gemessen werden? Wer nur den Fingerprint-Bereich ab einigen hundert cm^{-1} braucht, kann deutlich entspannter filtern als jemand, der 10–50 cm^{-1} sehen will. Drittens: Wird nur Stokes, nur Anti-Stokes oder beides gleichzeitig benötigt? Viertens: Liegt eine Common-Path-/Backscatter-Geometrie vor oder sind Anregung und Sammlung getrennt? Fünftens: Ist die Probe fluoreszierend, und wenn ja: kann man das besser durch Filterung oder besser durch eine andere Anregungswellenlänge entschärfen?

Wellenlängenpraktisch heißt das: 532 nm ist stark und mikroskopisch attraktiv, aber fluoreszenzanfällig; 633 nm ist oft ein brauchbarer Kompromiss; 785 nm ist für viele fluoreszierende organische Proben die pragmatische Erstwahl; 1064 nm ist das Werkzeug für harte Fluoreszenzfälle, verlangt aber ein NIR-geeignetes Gesamtsystem und akzeptiert signifikant schwächeres Raman. Für Resonance/UV-Raman kann wiederum gerade die kurze Wellenlänge der entscheidende Vorteil sein.

Die Spektrometerauflösung und der Filter-Cutoff dürfen nicht verwechselt werden. Ein Spektrometer kann rechnerisch sehr hohe Auflösung besitzen, aber wenn der eingesetzte Rayleigh-Blocker erst ab 100 cm^{-1} öffnet, ist unterhalb davon faktisch kein nutzbarer Zugang vorhanden. Umgekehrt nützt ein sehr steiler Filter wenig, wenn Spektrometer-Streulicht oder fehlerhafte Dichroik den Nahbereich ruinieren. Genau deshalb nennen Hersteller Low-Frequency-Module und triple-subtractive Systeme als eigene Lösungsklasse, statt das Problem nur durch “einen besseren Standardfilter” zu lösen.

Mechanisch und optisch sind AOI, Strahlkegel und Montageort mindestens so wichtig wie die Nennwellenlänge. Semrock und Thorlabs weisen beide darauf hin, dass dünnschichtige Filter bei steigendem AOI zu kürzeren Wellenlängen blauverschieben; zusätzlich trennen sich s- und p-polarisierte Spektren, und bei unkollimierten bzw. divergenten Strahlen verbreitert sich die Kante. Für Raman heißt das praktisch: Edge- und Notch-Filter sollten möglichst in einem kollimierten Abschnitt sitzen, und “mal eben etwas kippen” ist nur dann gut, wenn das Datenblatt oder ein Modell dafür explizit vorgesehen ist.

Zur Temperaturstabilität ist die nüchterne Aussage: Im normalen Laborbetrieb sind die Effekte oft klein, aber bei sehr steilen/schmalen Filtern nicht völlig vernachlässigbar. Omega nennt für gut verdichtete sichtbare Beschichtungen typische reversible Temperaturdriften von etwa 0.007 nm/°C, für weniger dichte Schutzschichten etwa 0.014 nm/°C; gleichzeitig sind solche Verschiebungen unter gut kontrollierten Laborbedingungen meist gering. Thorlabs spezifiziert für harte Bandpassfilter typische Einsatztemperaturen im Bereich −40 bis 90 °C. Wer also im Labor misst, muss hier selten priorisieren — wer im Prozess, in

wechselnder Umgebung oder mit sehr engen Shifts arbeitet, schon.

Für Budget und Platz gilt deshalb ein dreistufiger pragmatischer Ansatz. Minimal robust: Clean-up-Bandpass plus ein guter Longpass-Edge-Filter; bei getrennten Strahlwegen ohne Common-Path oft ausreichend. Empfohlen: schmaler Laser-Clean-up, Raman-optimierter ultrasteiler Edge-Filter und ein passender 45°-Dichroic für die Mikroskopie. High-End / Low-Frequency: spezialisierte VBG-/ULF-Filter oder triple-subtractive Optik, dazu ein besonders guter Dichroic mit kontrollierter Flatness und möglichst wenig Polarisationsartefakten. In engen Baugruppen sind montierte, geschwärzte bzw. streulichtoptimierte Fassungen sinnvoll, weil Rand- und Bypass-Streulicht reale Probleme erzeugen können.